

# 开敞条件下多孔可燃物阴燃实验研究\*

莫善军, 袁灼新, 梁 栋, 郑方杰

(中山大学工学院//广东省消防科学技术重点实验室, 广东 广州 510006)

**摘 要:** 与有焰火灾相比, 阴燃及其引起的火灾在实验和理论方面的研究较少, 尤其是开敞室内空间全尺寸阴燃实验研究比较缺乏。该文基于 ISO9705 燃烧室自制的阴燃试验台, 开展多孔可燃材料(聚氨酯软泡)阴燃实验, 分析聚氨酯软泡在不同的热流强度条件下引燃温度和升温速率的变化规律, 得到聚氨酯软泡在开敞条件下阴燃点燃过程中的化学变化过程和临界点燃温度。

**关键词:** 阴燃; 多孔可燃物; 开敞条件; 引燃

**中图分类号:** X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2013)04-0089-06

## Experimental Study of Smoldering Combustion of Porous Combustible Material in Open Space

MO Shanjun, YUAN Zhuoxin, LIANG Dong, ZHEN Fangjie

(1. School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Theoretical and experimental research on fire caused by smoldering reaction is insufficient in contrast with that on flame combustion. Especially the full-scale experimental study of smoldering combustion of porous combustible material in open room is scarce. Based on experiments of cellular combustible material, polyurethane, on a self-made test-bed in an ISO9705 fire room, the change trends on both ignition temperature and heating rate are analyzed under different initial heating flux. Further, the chemical reaction and supercritical temperature of smoldering ignition in open space are obtained and analyzed during the research.

**Key words:** smoldering combustion; cellular combustible material; open space; ignite

阴燃是一种发生在气相和固相界面处的化学反应, 而没有气相火焰的缓慢燃烧现象, 多发生在多孔积炭型材料中。随着城市的现代化, 大量易燃的多孔类高分子聚合物广泛应用于建筑、装饰领域, 由此导致的阴燃火灾时有发生, 此类火灾释放出大量浓烟和有毒气体, 严重危及人民的生命安全<sup>[1]</sup>。阴燃火灾多发生于材料内部, 难于探测和熄灭, 因此潜在危险性很大; 与有焰燃烧相比, 很少的热量就能使材料发生阴燃, 并在一定条件下向明火转化, 形成轰燃导致发生严重的火灾事故。因此, 阴燃的实验研究和理论分析在火灾科学研究特别是在火灾事故原因分析中具有十分重要的现实意义。

阴燃以异相反应为主, 其燃烧过程具有缓慢、低温、自维持传播的特点。阴燃主要是由于多孔材料表面的异相氧化放热反应引起, 在异相反应中, 材料表面吸附扩散而来的氧气, 发生放热热解反应, 解吸出气体并形成焦炭。当材料空隙率较高时, 阴燃反应从表面传播至内部。若阴燃反应区的放热大于等于向外界的散热和材料吸热时, 阴燃能自维持传播并释放出大量的有毒气体。在适宜的条件下, 阴燃将向有焰火转变, 发生气相燃烧。着火温度是火灾中可燃物燃烧性能的最重要参数, 它直接反应了材料的火灾危险性。与明火燃烧不同, 可燃物在阴燃点燃过程不会出现明火等直观物理现

\* 收稿日期: 2012-11-08

基金项目: 广东省科技计划资助项目(2009B060700110, 2010390004208082); 广东省安全生产专项资金资助项目(2008-17-A)

作者简介: 莫善军(1978年生), 男; 通讯作者: 梁栋; E-mail: gzliangd@163.com

象, 通过火光判据无法判定材料是否已经发生阴燃。由于采用传统热解动力学算法, 很难对可燃物在空气气氛的热解氧化过程进行详细分析, 学者们对阴燃点燃主要定性地从可燃物在化学反应中热释放速率开始超过系统的热损失速率来分析相关特征点。

目前, 对于阴燃火灾实验装置和性能表征没有统一的标准, 学者们对于实验研究多数是采用自建小尺寸阴燃实验台, 相关表述阴燃火灾的物理量也不一致。Anthenine 和 Fernandez-Pello<sup>[2]</sup>认为阴燃波向前传播需要的热量应大于等于阴燃反应区向加热区散失的热量  $\rho C_p u_s (T_p - T_0) \geq \lambda (T_p - T_A) / x_{\min}$ 。路长等<sup>[3]</sup>通过实验发现当离加热面 6 cm 处的温度大约超过 110 °C, 同时离加热面 3 cm 处温度高于 300 °C, 可燃材料处于氧化反应状态, 阴燃能实现自维持传播, 而低于 110 °C 时则会很快熄灭。Walter 等<sup>[4]</sup>在空气气氛下对无阻燃聚氨酯进行阴燃实验, 发现当离加热面 3 cm 处的温度低于 300 °C, 由于可燃物氧化反应释放的热量不足以促使阴燃向前传播, 阴燃很快就发生熄灭; 反之温度高于 300 °C, 使得该处的聚氨酯材料氧化反应加速释放大量的热量, 从而推动阴燃向前传播。以往的实验研究多在小尺寸阴燃炉中进行, 严格控制影响条件, 包括加热的条件、材料的尺寸、氧化剂等<sup>[5]</sup>, 而开敞的室内空间全尺寸阴燃实验研究和燃烧现象分析数据相对较少, 由于阴燃引发火灾事故调查分析更是缺乏相关阴燃过程数据支撑<sup>[6]</sup>。

本文在自制的全尺寸阴燃实验台进行聚氨酯软泡点燃试验, 分析聚氨酯软泡在不同的热流强度条件下引燃温度和升温速率的变化规律, 得到聚氨酯软泡在开敞条件下阴燃点燃过程中的化学变化过程和临界点燃温度, 探讨小尺寸实验和全尺寸实验阴燃过程的差异性, 为阴燃引发的火灾事故原因调查分析提供实验参考数据。

## 1 实验部分

### 1.1 实验装置

阴燃实验在 ISO9705 全尺寸燃烧室中开展, 实验系统由燃烧装置、阴燃反应实验体 (聚氨酯泡沫材料)、加热器 (包括电压调节器和多孔陶瓷加热片)、电子精密天平、K 型热电偶、安捷伦 34970A 数据采集仪等装置组成。由热电偶测量、数据采集系统记录和处理阴燃过程中材料内部温度的变化, 实验过程中观察阴燃发生、蔓延和向有焰火转化的各个阶段, 分析各阶段的反应机理。

阴燃实验系统核心部分为燃烧装置设计, 装置

底部支撑为角型铝材, 支撑在电子天平上, 电子天平用于实时记录多孔可燃材料燃烧失重过程。支架由铜管制成, 铜管上焊接细铜管, 细铜管用于安装热电偶, 详细设计如图 1 所示。

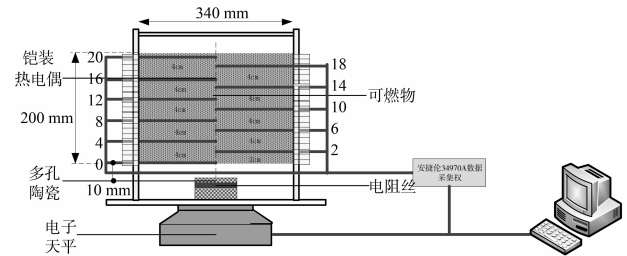


图 1 阴燃装置

Fig. 1 Experiment device of smoldering

### 1.2 实验工况

实验材料采用聚氨酯泡沫材料, 其孔隙度为 0.975, 密度为 26.5 kg/m<sup>3</sup>, 材料的尺寸为  $D = 34$  cm,  $L = 20$  cm, 质量为 344.34 g。实验过程中通过调节加热片的电压来改变加热功率点燃泡沫材料。为使阴燃能够实现成功点燃, 需要形成一个约为 40 mm 至 50 mm 的最小炭层厚度<sup>[2]</sup>, 为了保证炭层厚度, 本实验设计当离加热器的距离为 4 cm 的热电偶所测的温度达到 400 °C 时停止加热。

实验工况如表 1 所示。实验中分别采用 88, 100, 120, 140, 160, 180 V 六种不同的加热电压聚氨酯泡沫材料进行点燃, 并通过测量和拟合出相应的加热热流值。实验 (1) 至 (6) 材料内部阴燃温度由 11 根热电偶测量, 记录温度和质量其随时间变化的曲线。距离聚氨酯泡沫材料底部为 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 cm 的材料

表 1 实验工况和现象记录表<sup>1)</sup>

Table 1 The record of experiment condition and combustion phenomenon

序列	电压及其对应拟合热流	停止加热条件	实验现象
(1)	88 V (4.87 W/m <sup>2</sup> )	T4 = 400 °C	未形成有焰火
(2)	100 V (5.23 W/m <sup>2</sup> )	T4 = 400 °C	右半边形成有焰火
(3)	120 V (6.8 W/m <sup>2</sup> )	T4 = 400 °C	未形成有焰火
(4)	140 V (8.9 W/m <sup>2</sup> )	T4 = 400 °C	停止加热一段时间后内部形成有焰火
(5)	160 V (11.9 W/m <sup>2</sup> )	T4 = 400 °C	很快形成有焰火
(6)	180 V (14.8 W/m <sup>2</sup> )	T4 = 400 °C	很快形成有焰火

1) 实验 (2) 出现右半边形成有焰火的现象偏差。这虽不符合这一系列电压得出实验现象和结果的规律变化, 但在未转有焰火前, 其现象和结果仍较为合理, 故对考察其阴燃点燃和阴燃传播的特点影响不大

中心线上的点的温度值记为 T0, T2, T4, T6, T8, T10, T12, T14, T16, T18, T20。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 引燃时间

考虑成功点燃所需的最小炭层厚度和停止加热条件 T4 = 400 °C 的影响, 因 T8 温度在刚停止加热条件下, 温度 < 300 °C 而尚未达到稳定阴燃状态, 因此以 T8 温度变化考察实验的阴燃临界点燃温度。做出实验 (1) - (4) T8 温度时间曲线及其温度时间导数曲线, 如图 2 至图 5 所示。在已有研究的小尺寸实验中, 根据聚氨酯泡沫材料自身热解机理, 阴燃稳定点燃前一般分为三个阶段<sup>[7]</sup>: 第一阶段为外加热的对流辐射作用为主导的加热酝酿期, 没有化学反应或化学反应不显著; 第二阶段为自身热解为主的吸热期, 材料升温速率增加得相对缓慢; 第三阶段为氧化作用为主的放热期, 升温速率增加较快, 聚氨酯材料温度快速上升<sup>[7-8]</sup>。本文沿用此理论分析, 这是因为开敞条件下氨酯泡沫材料阴燃除通风条件和氧浓度变化有所不同外, 自身热解氧化机理和小尺寸条件类无较大差异。

观察图 2 中 88 V (4.87 W/m<sup>2</sup>) 时 T8 变化曲线, 在 0 到 400 s 时间内, T8 所在的部分材料呈现典型外加热作用为主导的加热酝酿期, 由于吸收底部向上传播的热量大于材料向外界散热量和较少的热解吸热量而缓慢升温。而在其后 400 s 到 435 s 内, 材料热解反应为主导, 升温速率略有下降, 温度继续缓慢上升。在 435 s 后, 氧化反应逐渐起明显主导作用, 并随着可燃物温度上升而氧化反应加快, 升温速率大大加快, 并在 529 s 达到升温速率最大值 2.6 °C/s。随氧气浓度和可燃物质的变化, 氧化反应动力学的推进, T8 升温速率降低, 并在降低过程中受氧浓度和局部条件影响出现升温速率波动, 而温度持续上升。而在 680 s, T8 温度上升到 377 °C。考虑在 680 s 后的一段时间内, 升温速率在平均值约为 0.3 °C/s 的较小范围内波动。故实验 (1) 条件下的阴燃临界点燃温度为 377 °C, 阴燃点燃时间为 680 s。并在 680 ~ 1 066 s 内, T8 附近的聚氨酯泡沫材料实现稳定阴燃。在 1 066 s 后, 随聚氨酯泡沫料可燃物较少, 开敞条件下散热较快, 其温度快速下降, 最后缓慢降至室温。

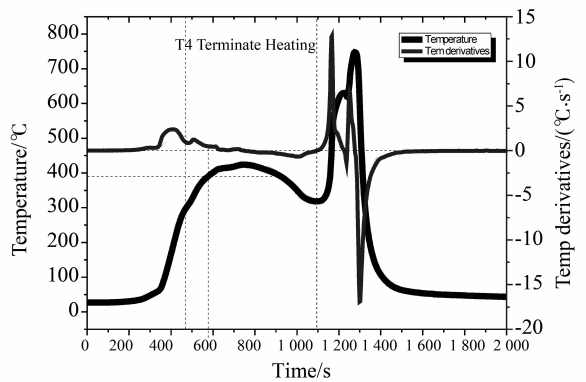
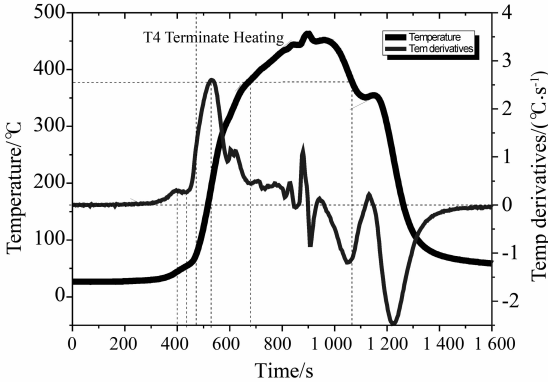


图 2 88 V (4.87 W/m<sup>2</sup>) 和 100 V (5.23 W/m<sup>2</sup>) 加热条件下 T8 温度 - 时间曲线

Fig. 2 The temperature-time curve of T8 in the heating condition of 88 V (4.87 W/m<sup>2</sup>) and 100 V (5.23 W/m<sup>2</sup>)

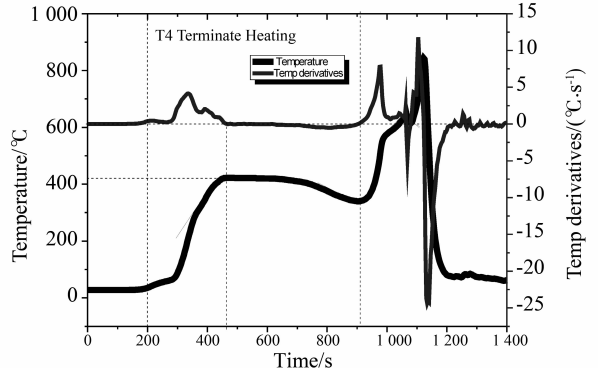
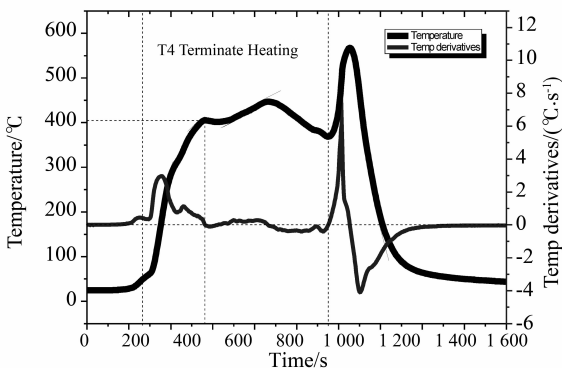


图 3 120 V (6.8 W/m<sup>2</sup>) 和 140 V (8.9 W/m<sup>2</sup>) 加热条件下 T8 温度 - 时间曲线

Fig. 3 The temperature-time curve of T8 in the heating condition of 120 V (6.8 W/m<sup>2</sup>) and 140 V (8.9 W/m<sup>2</sup>)

实验 (2) - (4) T8 温度曲线与实验 (1) T8 温度曲线变化规律大体上是类似的。虽然 100 V ( $5.23 \text{ W/m}^2$ ) 与 140 V ( $8.9 \text{ W/m}^2$ ) 实验条件下, 聚氨酯泡沫料阴燃后期有局部或整体的转化为明火现象, 但不影响分析得出其阴燃临界点燃温度。88 V ( $4.87 \text{ W/m}^2$ )、100 V ( $5.23 \text{ W/m}^2$ )、120 V ( $6.8 \text{ W/m}^2$ ) 和 140 V ( $8.9 \text{ W/m}^2$ ) 加热条件下阴燃临界点燃温度分别为 377 °C、390 °C、405 °C 和 421 °C, 引燃时间分别为 680、578、562、463 s。不同加热条件下, 最大升温速率值稳定在  $2.6 \sim 4 \text{ }^\circ\text{C/s}$  范围内。其中 100 V ( $5.23 \text{ W/m}^2$ )、120 V ( $6.8 \text{ W/m}^2$ ) 和 140 V ( $8.9 \text{ W/m}^2$ ) 分别在 1 095、1 150、910 s 后由阴燃转化为明火燃烧。

与小尺寸阴燃相比, 开敞条件下聚氨酯泡沫料阴燃有散热充分、对流作用较强和氧气补充迅速等特点, 实验所得温度曲线与小尺寸实验结果存在一些差异。

1) 开敞条件下阴燃临界点燃温度略高。在本文所设定加热条件阴燃临界点燃温度在  $364 \sim 421 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内, 而小尺寸实验条件则一般在  $302 \sim 340$

$^\circ\text{C}$  范围内。

2) 阴燃点燃的时间随加热热流提高而减小。加热热流提高到一定程度, 聚氨酯泡沫料不再出现阴燃, 而是直接有焰火燃烧。

3) 开敞条件下阴燃点燃前的热解作用主导的第二阶段进行时间 (在本文其值  $< 35 \text{ s}$ ) 比氧化作用主导的第三阶段短得多。随加热热流提高, 热解主导的阶段逐渐变得不明显或消失, 而氧化主导的阶段时间则逐渐缩短。

4) 氧化主导的温升阶段具有较稳定的最大升温速率, 开敞空间不同加热热流作用条件下聚氨酯泡沫材料达到稳定阴燃前的热解氧化反应速率达到的最大限度比较一致。

## 2.2 阴燃波传播

阴燃传播过程中热解氧化区域具有一定厚度, 并且随阴燃向前传播而区域大小及位置不断变化。则阴燃波可分为预热区、热解吸热区、氧化放热区和已燃冷却区<sup>[8-10]</sup>。而本文主要通过考察不同区域达到前面所述的阴燃临界点燃温度所需时间的比值来定义阴燃波的传播速度。

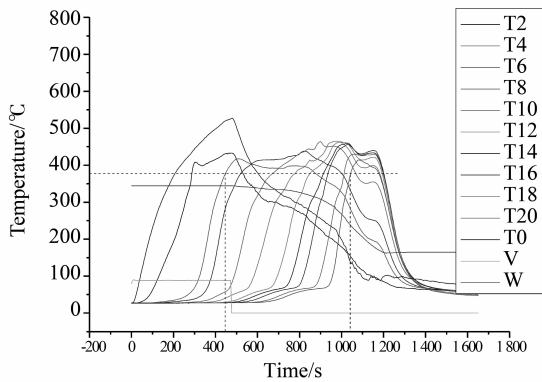


图 4 88 V ( $4.87 \text{ W/m}^2$ ) 和 100 V ( $5.23 \text{ W/m}^2$ ) 加热条件下温度 - 时间曲线

Fig. 4 The temperature-time curve of T8 in the heating condition of 88 V ( $4.87 \text{ W/m}^2$ ) and 100 V ( $5.23 \text{ W/m}^2$ )

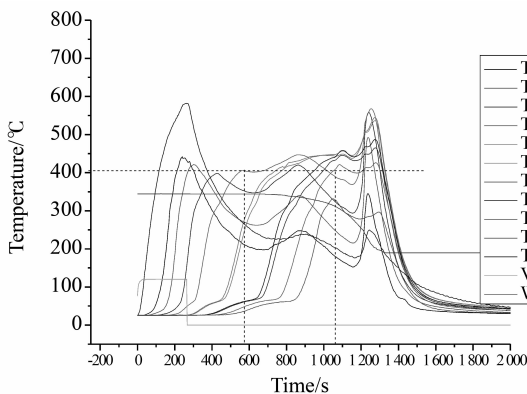
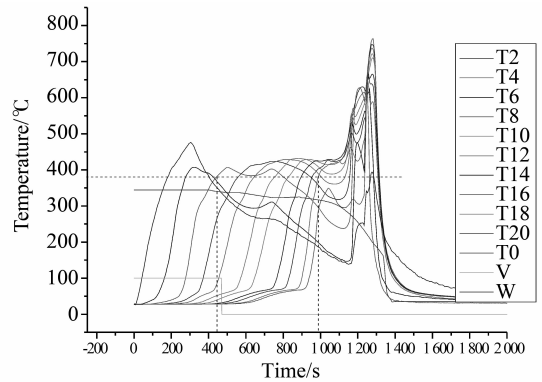
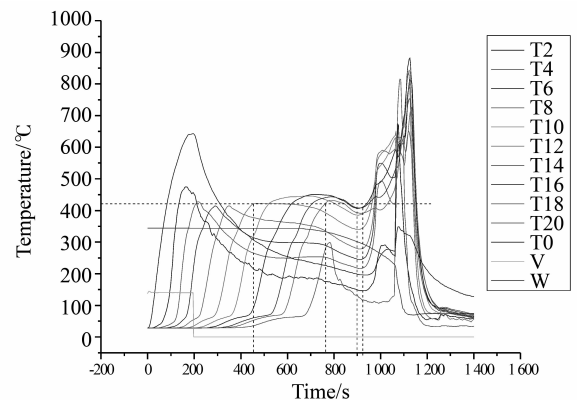


图 5 120 V ( $6.8 \text{ W/m}^2$ ) 和 140 V ( $8.9 \text{ W/m}^2$ ) 加热条件下温度 - 时间曲线

Fig. 5 The temperature-time curve of T8 in the heating condition of 120 V ( $6.8 \text{ W/m}^2$ ) and 140 V ( $8.9 \text{ W/m}^2$ )



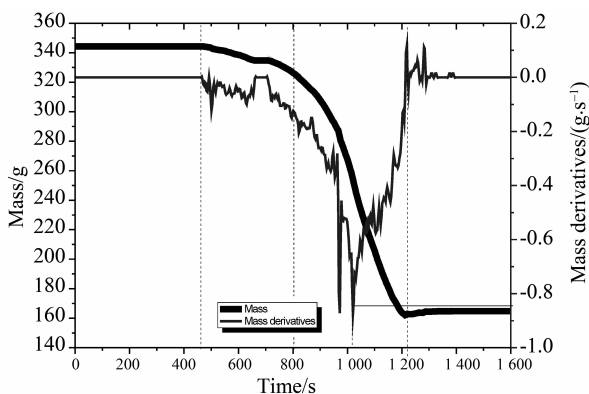
通过考察不同区域达到前面所述的阴燃临界点燃温度所需时间的比值来定义阴燃波的传播速度, 对应于 88 V ( $4.87 \text{ W/m}^2$ )、100 V ( $5.23 \text{ W/m}^2$ )、120 V ( $6.8 \text{ W/m}^2$ ) 和 140 V ( $8.9 \text{ W/m}^2$ ) 加热条件下阴燃临界点燃温度 377、390、405 和 421  $^{\circ}\text{C}$ , 其阴燃传播速度为 0.026 8、0.025 8、0.020 5 和 0.025 8  $\text{cm/s}$ 。而在其中相同参考下, 在 140 V ( $8.9 \text{ W/m}^2$ ) 加热条件下, 阴燃刚转化为明火燃烧向上传播至即将转为明火的上部区域的速度为 0.33  $\text{cm/s}$ , 其后传播速度陡增, 由局部转化为明火至整个材料发生明火燃烧。

尽管不同的热流强度的加热初始条件使得初始热量不尽相同, 阴燃临界点燃温度有所增加, 但这对氧浓度影响不大, 从而阴燃传播速度大体相同。这符合了前面提到的开敞条件下阴燃的氧浓度相对均匀的特点。而只要满足热量条件, 阴燃将转化为明火燃烧, 同样有小尺寸实验传播速度剧烈增大的特点。

### 2.3 质量损失分析

与局部温度讨论其阴燃变化过程不同, 质量损失速率表征物质整体在阴燃传播过程中发生热解氧化反应的剧烈程度。因实验 (2) 的实验偏差对质量损失分析不可忽略, 故考察实验 (1), (3), (4), (5), (6) 阴燃过程中材料质量和质量损失速率随时间变化曲线如图 6 至 8 所示。根据前述的现象及温度曲线, 对应图 6 至图 7 的实验 (1)、(3) 和 (4) 表现聚氨酯泡沫材料有明显阴燃点燃及传播过程现象, 其中对应图 7 的实验 (4) 伴有明火转化现象。对应图 7 和图 8 中的实验 (5) 和 (6) 则因阴燃转化为明火极为迅速, 可视为无阴燃现象的有焰燃烧过程。

图 6 和图 7 质量变化曲线有相似的规律, 表现了加热条件下聚氨酯泡沫材料整体热解氧化进程。



如图 6 所示, 0 ~ 462 s 内, 材料整体主要吸收加热热流及向上传热与向环境散热而自身不发生热解氧化反应, 或热解氧化反应不明显, 使得材料较大部分尤其是上部处于预热区。462 ~ 804 s 内, 材料整体发生较明显的热解氧化作用, 但由于散热条件良好、氧浓度限制及阴燃向上传播不充分, 使得材料较大一部分处于自身热解反应为主而吸热传热的状态, 材料预热区和热解吸热区仍较厚, 出现逐渐增厚的氧化放热区, 因而质量损失速率在较小的范围内稳定增大。而 804 ~ 1 017 s 内, 随阴燃向上传播, 材料各部分普遍处于稳定阴燃状况下。这是由于热量积累充分、上部对流作用强、氧浓度高, 使得材料整体以氧化作用为主, 阴燃愈发旺盛, 材料中部处于较厚的氧化放热区。故质量损失速率逐渐增大, 质量损失速率达到 0.85  $\text{g/s}$  的最大值。1 017 s 后由于材料下部阴燃逐渐殆尽, 热解氧化作用逐渐减弱而质量损失速率减小为 0。1 220 s 后, 质量和质量损失速率几乎不再变化, 即整体阴燃结束。需要指出的是 472 s 时, 实验已停止加热。而在质量变化整个过程, 质量损失速率虽先增大后减小, 而其值 0 ~ 0.85  $\text{g/s}$ 。因而在一定范围内, 可粗略认为质量变化较为稳定, 462 ~ 1 220 s 平均质量损失速率为 0.24  $\text{g/s}$ 。

在加热条件提高至 120 V ( $6.8 \text{ W/m}^2$ ) 和 140 V ( $8.9 \text{ W/m}^2$ ) 后, 质量损失速率最大值为 0.96  $\text{g/s}$  和 6.7  $\text{g/s}$ , 这是因为后者在 1 055 ~ 1 070 s 发生剧烈转有焰火的现象。而 88 V ( $4.87 \text{ W/m}^2$ )、120 V ( $6.8 \text{ W/m}^2$ ) 和 140 V ( $8.9 \text{ W/m}^2$ ) 加热条件下未转有明火的阴燃过程的质量损失速率有相近的最大值, 分别为 0.85、0.96 和 0.79  $\text{g/s}$ 。从质量变化开始到质量不再变化, 所持续时间分别为 758、633 和 498 s, 平均质量损失速率分别为 0.24、0.23 和 0.52  $\text{g/s}$ 。

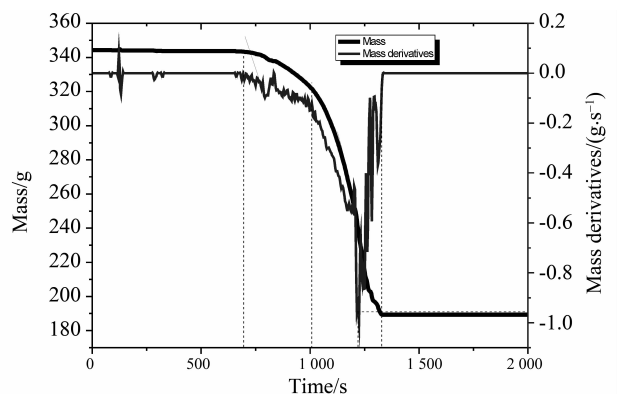


图 6 88 V ( $4.87 \text{ W/m}^2$ ) 和 120 V ( $6.8 \text{ W/m}^2$ ) 加热条件下质量 - 时间曲线

Fig. 6 The quality-time curve of T8 in the heating condition of 88 V ( $4.87 \text{ W/m}^2$ ) and 120 V ( $6.8 \text{ W/m}^2$ )

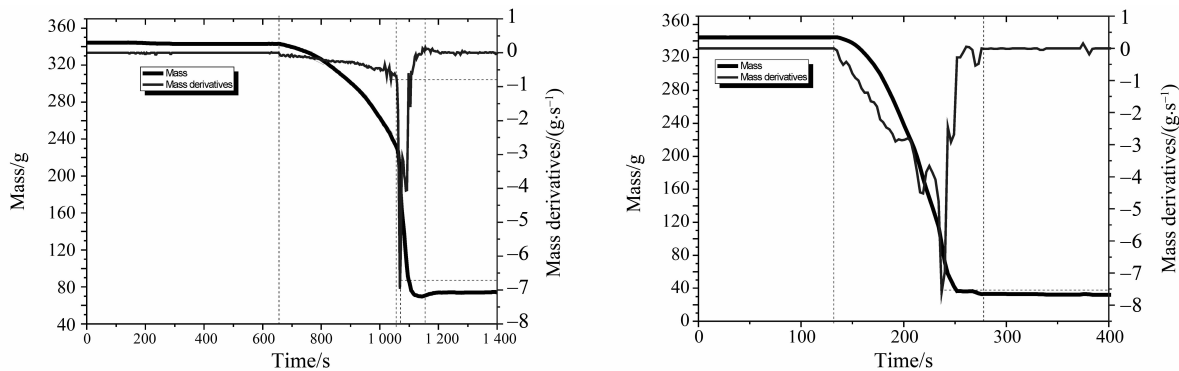


图 7 140 V (8.9 W/m<sup>2</sup>) 和 160 V (11.9 W/m<sup>2</sup>) 加热条件下质量 - 时间曲线

Fig. 7 The quality-time curve of T8 in the heating condition of 140 V (8.9 W/m<sup>2</sup>) and 160 V (11.9 W/m<sup>2</sup>)

图 7 和图 8 表示 160 V (11.9 W/m<sup>2</sup>) 和 180 V (14.8 W/m<sup>2</sup>) 加热条件下聚氨酯泡沫材料有焰燃烧的质量变化情况: 从质量开始变化到不再变化所持续的时间为 146 s 和 156 s, 最大质量损失速率为 7.53 g/s 和 6.93 g/s, 平均质量损失速率为 2.15 g/s 和 2.0 g/s。

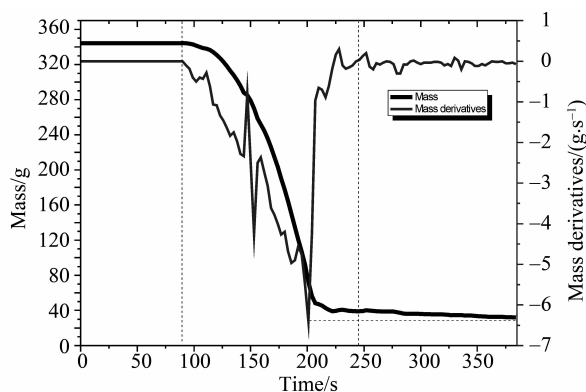


图 8 180 V (14.8 W/m<sup>2</sup>) 加热条件下质量 - 时间曲线

Fig. 8 The quality-time curve of T8 in the heating condition of 180 V (14.8 W/m<sup>2</sup>)

上述结果表明, 平均质量损失速率和最大质量损失速率的大小可作为区别开敞条件下纯阴燃、有转化为明火的阴燃和纯有焰燃烧的特征。这是因为阴燃的热解氧化作用释放热量和导致的物质分解程度比有焰燃烧低的多。一般而言, 除加热外的其他条件若相同, 对于整个聚氨酯泡沫材料:

$$\begin{aligned} (dm/dt)_{\max}^{\text{纯阴燃}} &< (dm/dt)_{\max}^{\text{有明火阴燃}} < (dm/dt)_{\max}^{\text{纯有焰燃烧}} \\ (\Delta m/\Delta t)_{\text{纯阴燃}} &< (\Delta m/\Delta t)_{\text{有明火阴燃}} < (\Delta m/\Delta t)_{\text{纯有焰燃烧}} \end{aligned}$$

### 3 总 结

可燃物在开敞空间能充分散热, 且气体对流作用较强, 氧气补充迅速, 这对其阴燃以及转化为明火的过程有一定的影响。在本文实验条件下的开敞条件下聚氨酯泡沫料阴燃研究表明, 阴燃临界点燃温度相对小尺寸实验条件有所变化; 不同热流条件下, 达到稳定阴燃前的热解氧化反应速率达到的最大限度有一致性, 而稳定阴燃时阴燃波传播速度大致相当, 质量损失速率可作为区分纯阴燃、有明火阴燃和纯有焰燃烧的特征。

#### 参考文献:

- [1] 邵占杰. 阴燃及其传播特性研究[D]. 安徽: 中国科学技术大学, 2003.
- [2] WALTHER D C, ANTHENIEN R A, FERNANDEZ-PELLO A C. Smolder ignition of polyurethane foam: Effect of oxygen concentration [J]. Fire Safety Journal. 2000, 34 (4): 343 - 359.
- [3] 路长, 彭磊, 周建军, 等. 聚氨酯泡沫材料阴燃的点燃过程[J]. 燃烧科学与技术, 2005, 11(6): 487 - 492.
- [4] DAVID C W, FERNANDEZ-PELLO A C, URBAN D L. Space shuttle based microgravity smoldering combustion experiments [J]. Combustion and Flame, 1999, 116: 398 - 414.
- [5] ANDERSON M K, SLEIGHT R T, TORERO J L. Downward smolder of polyurethane foam: Ignition signatures [J]. Fire Safety Journal, 2000, 35: 131 - 147.
- [6] 沈浩, 李盈宇, 梁栋. GC-MS 定量分析火场残留物中汽油组成[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2012, 51(1): 59 - 62.
- [7] 林龙沅, 周建军, 等. 聚氨酯泡沫材料阴燃发展过程的特性分析[J]. 火灾科学, 2007, 16(1): 43 - 47.
- [8] 雷毅, 梁栋, 莫善军. 聚氨酯软泡热解动力学与阴燃点燃特性研究[J]. 消防科学技术, 2011, 30(10): 881 - 885.
- [9] 汪丽, 余小岚, 黄滨. 氧弹燃烧法测定环氧树脂中氮含量[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2009, 48(3): 139 - 141.
- [10] 雷毅. 多孔类可燃物热解与阴燃特性的机理研究[D]. 广州: 中山大学, 2011.